



东北电力大学

NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY

# 毕 业 设 计 论 文

## 直流电压源逆变器及其消谐调制 技术研究

学 生 姓 名：呼延汀

班 级：电自 9532

学 号：1095703063214

指 导 教 师：公孙玲珑

所 在 单 位：电气工程学院

答 辩 日 期：1099 年 06 月 11 日

## 摘 要

随着电力电子器件的发展，PWM 电压型逆变器在交流变频调速、UPS、电能质量控制器、轻型直流输电换流器等电力电子装置中得到了越来越广泛的应用。PWM 电压型逆变器直流侧所需的理想无脉动直流电压源通常通过整流加上大直流电容滤波获得。大直流滤波电容的使用，给装置带来占用空间大、成本高及严重影响电能质量方面的问题。因此，研究如何减小甚至去除逆变器直流侧电容，以及解决因其产生的低次谐波和相关问题，

具有十分重要的理论意义和实用价值。本文在综述了国内外在 PWM 电压型逆变器及各种抑制谐波 PWM 技术的基础上，对目前工程中应用最广泛的 SPWM 电压型逆变器的主电路及谐波消除调制技术和相关问题进行了深入研究。

**关键字：**PWM 逆变器；直流电容；调制波重构 SPWM；六脉动直流电压；PWM 逆变器；直流电容；调制波重构 SPWM；六脉动直流电压；PWM 逆变器；直流电容；调制波重构 SPWM；六脉动直流电压

## ABSTRACT

With the rapid development of the power and electron parts, PWM voltage inverter is applied, on a larger and larger scale, to ac frequency control system 、 UPS、 power quality controller and Converter of high light HVDC transmission. Non-ripple DC voltage source of PWM voltage type Inverter is gained by rectifiers paralleled connection a large DC filter capacitor. The equipment that uses a large DC filter capacitor has disadvantages, such as bulk, high price and low power quality. It is therefore becoming most significant and valuable to do research on how to reduce capacitance as small as possible or even remove capacitor and how to settle relative issues and to eliminate low order harmonics due to minishing capacitance or removing capacitor. Based on the survey of main circuits of inverter and restraining harmonic effects of PWM techniques, the main circuits and harmonic elimination PWM techniques of SPWM voltage type inverter, which applied widely in industry fields, are profoundly analyzed.

**Keywords:** PWM inverter; DC capacitor; Six-ripple DC voltage; Modulation wave reconstruction SPWM

# 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
目 录 .....	III
第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 课题背景及研究的意义 .....	1
1.1.1 课题背景 .....	1
1.1.2 课题研究的意义 .....	1
1.2 PWM 逆变器研究现状 .....	1
1.3 本文完成的主要工作 .....	1
第 2 章 PWM 逆变器工作原理 .....	3
2.1 二级标题 .....	3
2.2 三级标题 .....	3
第 3 章 一些引用和表格示例 .....	5
3.1 参考文献引用 .....	5
3.2 右编号公式 .....	5
3.3 表格 .....	5
3.3.1 合并水平单元格 .....	9
3.3.2 合并竖直单元格 .....	9
3.3.3 同时合并行和列 .....	10
结 论 .....	11
参 考 文 献 .....	12
致 谢 .....	13
附录 1 .....	14
附录 2 .....	18

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 课题背景及研究的意义

### 1.1.1 课题背景

50 年代末晶闸管标志着电力电子半导体期间的开端。电力电子器件经历了 40 多年的发展历程 [1,2]，特别是近 30 多年内更是得到了迅猛的发展 [3，4]。以 Th(SCR) 为代表的半控型器件是第一代电力电子器件 [5]，其主要用于可控整流装置，若用于可控的逆变器，因其无法自行关断，须配置强迫换流电路，致使装置复杂化。70 年代中期，相继研制成功的电流控制型的双极性晶体管 (Bipolar Junction Transistor——BJT)、门极可关断晶闸管 (Gate Turn-off Thyristor——GTO) 以及电压控制型的电力场效应晶体管 (Power MOS Field-effect Transistor——P-MOSFET) 等全控型器件被称为第二代电力电子器件 [6]

### 1.1.2 课题研究的意义

由于 PWM 逆变器的广泛应用及谐波会产生上述的诸多危害，因此必须对 PWM 逆变器的主电路及其谐波抑制技术进行研究。

## 1.2 PWM 逆变器研究现状

所谓逆变器，是指整流 (又称顺变) 器的逆向变换装置。作为现代电力电子技术中最基本装置之一的 PWM 电压型逆变器是随着器件和控制技术的发展而不断发展起来的，采用 PWM 逆变技术的目的是为了获得不同或变化形式的电能。早期的半导体器件是普通的晶闸管半控型器件，其开关频率很低，逆变输出的交流电压的波形基本上是方波型。

## 1.3 本文完成的主要工作

综上所述，为了进一步提高应用最为广泛的 SPWM 电压型逆变器的性能，获得良好的经济效益，必须对其主电路及谐波消除调制技术进行研究，解决 SPWM 逆变器主电路及谐波等问题。

本文所要完成的主要内容包括以下几个方面：

- (1) 传统 SPWM 电压型逆变器为减……
- (2) 传统的 SPWM……
- (3) 对本文所提……
- (4) 本文运用……

## 第 2 章 PWM 逆变器工作原理

### 2.1 二级标题

### 2.2 三级标题

正文中的公式。采用公式编辑器进行编辑。

$$E_i = \int |c_i(t)|^2 dt = \sum_{j=1}^m |c_{ij}|^2 \quad (2-1)$$

其中， $c_{ij}(i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$  表示 IMF 的离散点的幅值， $m$  为信号采样点的数目。（公式中涉及的字母所代表的物理量要全部指明。右对齐，符号大小在公式编辑器中尺寸栏中的“define”下的‘full’项选 12，其他默认）

正文中的图（图题在图的下方，居中，图题文字为五号宋体，图中文字为小五号）

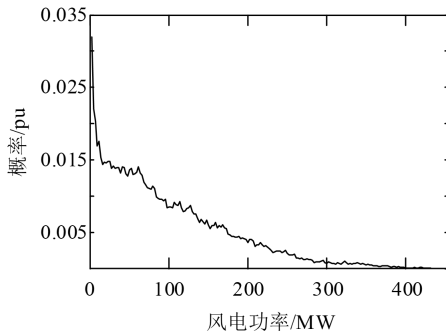


图 2-1: 功率密度概率密度分布曲线

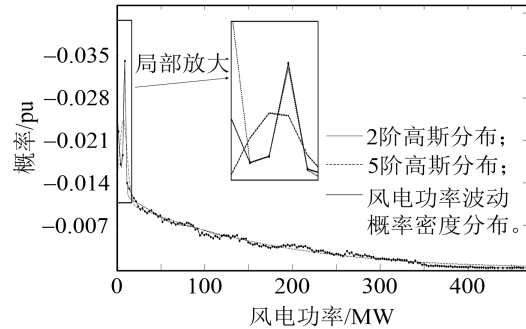
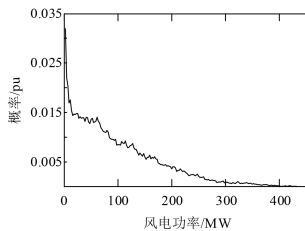
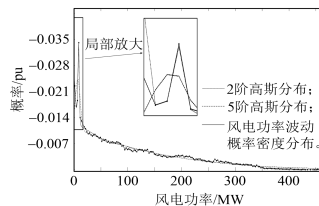


图 2-2: 功率密度概率密度分布拟合曲线

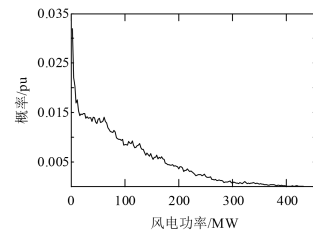
正文中的表。（采用三线表，表题为五号宋体，表中为小五宋体。表题在表上方，居中）



(a) subcaption1



(b) subcaption2



(c) subcaption3

图 2-3: caption

表 2-1: 一个只有引脚注释的表

流型	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8
A	.5284	.3418	.0550	.0449	.0175	.0026	.0039	.0058
A	.5326	.3416	.0571	.0423	.0155	.0024	.0036	.0059
B	.4580	.3080	.0914	.0623	.0312	.0323	.0096	.0082
B	.4542	.3160	.0919	.0646	.0345	.0226	.0068	.0095
C	.5782	.2105	.1041	.0439	.0476	.0053	.0077	.0028
C	.5762	.2155	.1006	.0421	.0502	.0043	.0087	.0034

注 1: This footnote shows what footnote symbols to use.



## 第 3 章 一些引用和表格示例

### 3.1 参考文献引用

I want to cite a new reference <sup>[1]</sup>, and another cite trial is here[2], and another cite trial is here[3].

### 3.2 右编号公式

带编号的公式需要放在 `equation` 环境中，同时可以设置公式引用标签。

$$y = ax + b \quad (3-1)$$

### 3.3 表格

正文中的表采用三线表，表题为五号宋体，表中为小五宋体。表题在表上方，居中

表应具有自明性。为使表格简洁易读，尽可能采用三线表，如表 3-1。

三条线可以使用 `booktabs` 宏包提供的命令生成。

表使用的注在三线表左下方顶格编写，同用小五宋体。

表格如果有附注，尤其是需要在表格中进行标注时，可以使用 `threeparttable` 宏包。

表 3-1: 三线表示例

文件名	描述
thuthesis.dtx	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件

表格应该尽量占满整行空间，具体拉长方法如下：

#### 1. 使用 `tabularx` 形式的表格

下面是 `tabularx` 的一些使用事项

>{\raggedright \arraybackslash}X 代表左对齐

>{\centering \arraybackslash}X 代表居中对齐

>{\raggedleft \arraybackslash}X 代表右对齐

`tabularx` 后的宽度部分还可以是 `0.5\textwidth` 或者 `0.8\textwidth`，或者干脆占满宽度 `\textwidth`

每一个 `tabularx` 表格至少要有一个 X 列！虽然兼容 `l,c,r` 写法，但纯 `l,c,r` 组成的 `tabularx` 表格会出错的！

单纯的应用 X，会因 latex 内置的换行方式导致报错（`Underfull \hbox (badness 10000)`），其中的 1000 代表换行方式导致的错误程度），这时候可以在设置对齐方式的时候添加如上代表对齐方式的代码，如 `>\raggedright\arraybackslash`X 以解决因为对齐方式产生的报错。

`tabularx` 在搜索最佳列宽时必须多次生成表格，因此速度要慢得多。此外，表格地多次膨胀可能会破坏某些 TEX 结构。

表 3-2: Notation symbols used in this paper

Notations	Definition
$C$	client set
$c \in C$	an element in the client set
$S$	server set
$s \in S$	an element in the server set
<b>index</b> $\leftarrow$ <code>compute_indices(<math>s</math>)</code>	compute the Bloom filter indices (returned as an array) related to a set element $s$
$\mathbf{BF}_C[\cdot]$	Bloom filter array for the set $C$ where $\mathbf{BF}_C[idx]$ with $idx \in \text{compute\_indices}(c)$ for all $c \in C$ is set to 1, otherwise 0.
$\delta$	threshold pulse function, <i>i.e.</i> , returns 1 if the input value is above(below) a threshold, otherwise returns 0
$LWE_{\mathbf{s}}^{n,q}(m) \in \mathbb{Z}_q^n \times \mathbb{Z}_q$	an LWE encryption of the message $m \in \mathbb{Z}_q$ w.r.t. secret key $\mathbf{s}$ and lattice dimension $n$
$LWE_{\mathbf{z}}^{N,Q}(m) \in \mathbb{Z}_Q^N \times \mathbb{Z}_Q$	an LWE encryption of the message $m \in \mathbb{Z}_Q$ w.r.t. secret key $\mathbf{z}$ and lattice dimension $N$

2. 调整表格长度还可以在具体的表格中使用 `p/m/b{xx cm}+\centering` 解决
3. 还有一种调整方法是在表头每格用 `box` 规定好宽度

name	taskA	taskB	taskC	taskD
xiaowang	80	50	70	90
laowang	90	70	80	100
gblaowang	100	100	100	100

-	Top gem	A	B	C	D
Surface quality	Flawless	90% flawless, 10% light defects and up to 2 defects	70% flawless, 30% light defects and up to 2 deep defects	40% flawless, 60% light defects and up to 10% deep defects	More than 60% light defects and up to 20% deep defects
Lustre	Excellent	Very good at least	Good at least	Medium at least	Low at least

表 3-3: 宝马 i3 电机的主要参数

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	40	极数	12
额定电压/V	360	铁心长度/mm	132.3
频率/Hz	50	定子槽数	72
额定转速/A	4000	定子槽型	平底槽
定子外径/mm	242.1	铁心材料	B20AT1500
定子内径/mm	180	磁钢牌号	38UH
转子外径/mm	178.6	绕组接法	Y

name	taskA	taskB	taskC	taskD
xiaowang	80	50	70	90
laowang	90	70	80	100
gblaowang	100	100	100	100

经实验，如果需要调到正好符合页边距，需要表头所有单元格的 `textwidth` 倍数总和为 0.747-0.84。调整好表格宽度的形式如下：

name	taskA	taskB	taskC	taskD
xiaowang	80	50	70	90
laowang	90	70	80	100
gblaowang	100	100	100	100

表 3-4: Somewhat long long long caption which is long

Header 1	Header 2
foo <sup>a</sup>	1 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Short footnote

<sup>b</sup> Short footnote

### 表格参数

`table` 后面加 `*` 表示双栏表格，如 `\begin{table*}...\end{table*}`。

表格中常用选项 `[htbp]` 是浮动格式：

**h** 当前位置。将图形放置在正文文本中给出该图形环境的地方。如果本页所剩的页面不够，这一参数将不起作用。

**t** 顶部。将图形放置在页面的顶部。

**b** 底部。将图形放置在页面的底部。

**p** 浮动页。将图形放置在一只允许有浮动对象的页面上。

一般使用 `[htb]` 这样的组合，只用 `[h]` 是没有用的。这样组合的意思就是 `latex` 会尽量满足排在前面的浮动格式，就是 `[h-t-b]` 这个顺序，让排版的效果尽量好。

`[!h]` 只是试图放在当前位置。如果页面剩下的部分放不下，还是会跑到下一页的。一般言，用 `[!h]` 选项经常会出现不能正确放置的问题，所以常用 `[ht]`、`[htbp]` 等。

如果你确实需要把图片放在当前位置，不容改变，可以用 `float` 宏包的 `[H]` 选项。不过如果这样做，出现放不下的问题时需要手工调整。

如某个表需要转页接排，可以使用 `longtable` 宏包，需要在随后的各页上重复表的编号。

表 3-5: 跨页长表格的表题

表头 1	表头 2	表头 3	表头 4
Row 1			
Row 2			
Row 3			
Row 4			
Row 5			
Row 6			
Row 7			
Row 8			
Row 9			
Row 10			

### 3.3.1 合并水平单元格

Latex 中合并表格中的水平单元格的命令是 `\multicolumn{n}{fixup}{text}`。其中 `n` 指合并的单元格个数，`fixup` 指对齐方式，`text` 是里面的文本。编辑如下代码，合并第 1 行的第 2,3 个单元格。在没有使用 `tabularx` 宏包的表格中可以使用

ab	cdef	
AB	CD	EF
gh	ij	kl
Student Number	IJ	KL

### 3.3.2 合并竖直单元格

合并竖直单元格的命令是 `\multirow{n}{*}{text}`，含义如上，只是需要加上中间那个 `{*}`，不加的话不会通过编译，具体原因不详。作为演示，我们合并第一

列的所有行。由于第一列被合并，因此下面几行的第一列中不再有内容，也即第一个 & 之前不再有内容。

ab	cdef	
	CD	EF
	ij	kl
	IJ	KL

### 3.3.3 同时合并行和列

如果需要同同时合并行和列，只需要将以上两个命令合起来使用便可。例如需要合并左上角的第 1,2 行和 1,2 列

ab		cd
		EF
gh	ij	kl
GH	IJ	KL

## 结 论

PWM 逆变器的应用已遍及各个工业领域，其整流侧大直流电容所带来的负面效应日益受到重视。研究如何尽量减小甚至去掉它以及由此所带来的谐波和相关问题及其解决方法具有十分重要的理论意义和实用价值。本文在综述了国内外对 PWM 逆变器及其谐波消除研究现状的基础上，对目前工程中应用最广泛的 SPWM 电压型逆变器的主电路及其谐波消除调制技术等基本问题进行了深入研究。

论文的主要工作如下。

- (1) 提出了……。
- (2) 对……。
- (3) 运用数学傅立叶级数理论。

## 参 考 文 献

- [1] 张守志, 赵亮, 胡乃静. 个性化推荐算法设计[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(8): 986-991.
- [2] HUANG S, CAI N, PACHECO P P, et al. Applications of support vector machine (svm) learning in cancer genomics[J]. Cancer genomics & proteomics, 2018, 15(1): 41-51.
- [3] HUANG S, CAI N, PACHECO P P, et al. Applications of support vector machine (svm) learning in cancer genomics[J]. Cancer genomics & proteomics, 2018, 15(1): 41-51.



## 致 谢

衷心感谢导师 ××× 教授和物理系 ×× 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 Robert Field 教授热心指导与帮助，不胜感激。

感谢 ××××× 实验室主任 ××× 教授，以及实验室全体老师和同窗们学的热情帮助和支持！

本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

## 附录 1

### 【封面说明】

1. 大论文标题为一号黑体字不加粗，需换行时应该在一个完整词义结束后强制换行。
2. 标题字数要适当，一般不宜超过 20 字，如果有些细节必须放进标题，为避免冗长，可以分成主标题和副标题，主标题写得简明，将细节放在副标题里。
3. 特别提醒：封面上不能出现页眉中的横线！
4. 封面表格日期根据实际答辩日期填写

### 【中文摘要及关键词说明】

1. 摘要又称内容提要，它应以浓缩的形式概括研究课题的内容、方法和观点，以及取得的成果和结论，应能反映整个内容的精华。中外文摘要以 300 — 500 字为宜，要独立成文，选词用语要避免与全文尤其是前言和结论部分雷同。
2. “摘要”标题二字为小二号、黑体不加粗、居中排版，两字中间空 2 格；段前设置 0.5 行；段后设置 1 行。
3. 正文缩进二字书写，采用小四号、宋体、不加粗形式，行间距为 1.5 倍行距。
4. 摘要内容后空一行顶格打印“关键词：”（小四号黑体字），其后为各关键词（小四号宋体字），各关键词之间用逗号分开，最后一个关键词后面无标点符号。关键词一般以 3—5 个为宜。

### 【关于页眉、页脚的说明】

1. 页眉设置采用：单线 0.5 磅；上面用小五号宋体不加粗书写“东北电力大学本科毕业设计论文”，文字居中排版，奇偶页页眉一致。
2. 页脚设置要求：中英文摘要、目录要求单独编排页脚编号，采用“I、II、III、IV、……”编号形式；第 1 章绪论开始采用“1、2、3、……”数字编号形式，直至最后一页统一排序。数字编号均采用小五号宋体不加粗形式。

## 【英文摘要说明】

1. 书写格式与中文摘要对应，英文均采用“Times New Roman”字体，小四不加粗，行间距 1.5 倍行距。
2. “摘要”二字英文作为标题一律用大写字母，小二号宋体加粗。
3. 排版时正文首行缩进两个汉字的字符，两端对齐。
4. 英文“关键词：”翻译形式为“Keywords:”首个字母大写，其余小写，小四字体加粗。各关键词英文翻译之间用分号隔开，最后一个后面不加符号。换行后首个字母与第一个关键词的首字母对齐，而非顶格书写，小四号字。
5. 摘要正文后空一行开始撰写关键词。各关键词除专业术语等按语法规则该大写的以外，其余全部用小写字母，包括首字母。

## 【目录说明】

1. 标题“目录”二字中间空两个格，其余格式与中文摘要标题相同。
2. 目录要求列出三级标题，第一级和第二级标题顶格书写，采用小四黑体不加粗形式；第三级标题缩进二个汉字字符书写，采用小四宋体不加粗形式；行距采用 1.5 倍。
- 3.(word) 目录最好采用“自动生成的目录”的方法，具体步骤见下面提示。  
(word)【目录自动生成方法】在目录处点击鼠标右键，选择“更新域”，弹出对话框后，选择“更新整个目录”，即可完成目录的自动生成。

## 【正文章节说明】

### 章节标题

（小二黑体不加粗，居中，章号与题名之间空两格，标题段前 0.5 行，段后 1 行，行距均为 1.5 倍行距。）

### 二级标题

（三号黑体不加粗，左对齐，标号与题目之间空两格，标题段前 0.5 行，段后 1 行）

### 三级标题

(四号宋体加粗, 左对齐, 标号与题目之间空两格, 标题段前 0.5 行, 段后 1 行。)

### 正文内容

(四号宋体, 两端对齐, 1.5 倍行距)

#### 【大论文正文书写要求】

1. 正文中任何部分不得打印到页边距之外, 稿纸不得随意接长或截短。
2. 正文字数不少于 1.5-2 万字含设计分析与计算、实验及数据处理、程序等; 正文内容为小四号字体不加粗, 1.5 倍行距, 首行缩进二个字;
3. 公式应另起一行写在稿纸中央, 一行写不完的长公式, 最好在等号处转行, 如做不到这点, 在数学符号 (如 “+”、“-” 号) 处转行, 数学符号应写在转行后的行首。公式的编号用圆括号括起放在公式右边行末, 在公式和编号之间不加虚线; 公式序号按章节顺序编号; 重复引用的公式不得另编新序号。示例见 2.1.1。
4. 表格按章节顺序编号, 表号、表题应放在表格上方, 表号、表题及表中用到文字应较正文小一号, 采用五号宋体; 表格允许下页接写, 接写时表题省略, 表头应重复书写, 并在右上方写 “续表 xx”。此外, 表格应写在离正文首次出现处的近处, 不应过分超前或拖后。示例见 2.1.1。
5. 毕业设计 (论文) 的插图必须精心制作, 线条要匀称, 图面要整洁美观, 插图应与正文呼应, 不得与正文脱节。每幅插图应有图号和图题, 按章节顺序编号, 图中坐标应标注单位, 图号、图题应放在图的下方, 图号、图题及图中涉及的文字字号应较正文小一号, 采用五号宋体。由若干分图组成的插图, 分图用 a,b,c... 标序, 分图的图名以及图中各种代号的意义, 以图注形式写在图题下方, 先写分图名, 另起行后写代号的意义。图应在描纸或洁白纸上用墨线绘成, 或用计算机绘图, 应符合相应国家标准的要求。示例见 2.1.1。
6. 毕业设计 (论文) 中有个别名词或情况需要解释时, 可加注说明, 注释可用页末注 (将注文放在加注页稿纸的下端) 或篇末注 (将全部注文集中在文章末尾), 而不用行中注 (夹在正文中的注)。若在同一页中有两个以上的注时, 按各注出现的先后, 须序编列注号, 注释只限于写在注释符号出现的同页, 不得隔页。(公式中涉及的字母所代表的物理量要全部指明。右对齐, 符号大小在公式编辑器中

尺寸栏中的“define”下的“full”项选 12，其他默认）正文中的图。（图题在图的下方，居中，图题文字为五号宋体，图中文字为小五号）正文中的表。（采用三线表，表题为五号宋体，表中为小五宋体。表题在表上方，居中）

7. 绪论中末小节必须为“本文完成的主要工作”

## 【结论说明】

1. 结论要单起一页，不按章编号，“结论”二字中间空两格。
2. 一般在 500-800 字为宜。
3. 结论应反映个人的研究工作，属于他人已有过的结论要少提。

## 【参考文献说明】

1. 参考文献也需另起一页，不按章编号。
2. 行距为 1.5 倍行距。中文为小四宋体，英文为小四 Times New Roman，编号后空 2 小格。悬挂缩进与首行对齐。标点除括弧为半角外，其余均为全角。
3. 参考文献必须在 12 篇以上，英文文献至少 1 篇，近 5 年文献至少 6 篇，其中文献应以科技类期刊杂志中的科技论文为主，本科学习阶段的教材尽量少列为参考文献。参考文献要全面，比如：“电力系统规划及发电厂电气部分设计”尽量涉及国家能源政策、系统规划、工程造价、环境影响、防雷等方面的文献。

## 【致谢说明】

致谢应以简短的文字对课题研究及论文撰写过程中曾直接给予帮助的人员（例如指导教师、答疑教师及其他人员）表示自己的谢意，这不仅是一种礼貌，也是对他人劳动的尊重，是治学者应有的思想作风。

## 【附录说明】

对于一些不宜放入正文中、但作为毕业设计（论文）又不可残缺，的组成部分，或有主要参考价值的内容，可编入毕设计（论文）的附录中，例如，公式的推演、编写的算法语言程序等。如果毕业设计中引用的实例、数据资料，实验结果等符号较多时，为了节约篇幅，便于读者查阅，可以编写一个符号说明，注明符号代表的意义。附录的篇幅不宜太多，附录一般不要超过正文。

## 附录 2

some text in Appendix B